

"TRATAMENTO DE MACIÇO DE TÚNEL URBANO SOB CONDIÇÕES CRÍTICAS"

Antônio Cezar Motta Caleiro
Construtora Andrade Gutierrez S/A.
Carlos Augusto Campanhã
Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda.
Luiz Guilherme F. S. de Mello
Victor F. B. de Mello & Associados S/C Ltda.

RESUMO

Serão enfocados, no presente trabalho, os serviços de melhoria de maciço e a penetração de um túnel urbano, na cidade de Belo Horizonte, denominado Túnel da Lagoinha. Tratando-se de obra urbana, aliada a condições altamente desfavoráveis de maciço, foram necessários vários estudos para a melhoria do maciço, a fim de permitir o avanço seguro do túnel.

Desta forma, o trabalho relata os serviços executados, para servirem como parâmetros de comparação para obras semelhantes e compreende os seguintes tópicos:

- Situação da obra.
- Tratamento do tramo inicial, abóbada e contorno com colunas C.C.P.
- Tratamento do maciço através de injeções de "clacagem" introduzindo-se sugestões visando melhorar o controle e a qualidade dos serviços.
- Drenagem do maciço através de poços profundos.

1. DESCRIÇÃO E SITUAÇÃO DA OBRA

A duplicação do Túnel Lagoinha - Concórdia, em pleno centro de Belo Horizonte, é uma das obras viárias mais importantes em execução na capital mineira. Quando concluída, em fevereiro de 1987, beneficiará diretamente mais de um milhão de pessoas que vivem na região norte da cidade.

Executado ao lado do atual, construído há 15 anos, o novo túnel terá dois andares de pista, sendo o superior com três faixas de trânsito para atender o movimento no sentido centro-bairro e o inferior com duas faixas em mão dupla, exclusivas para ônibus. Os veículos que se dirigem do bairro para o centro trafegarão no túnel atual, em três faixas de rolamento. Assim, a duplicação permitirá quadruplicar o fluxo de tráfego, (Fig.1).

O novo túnel terá 400mm de extensão, com greide de + 3.25% do emboque sul para o emboque norte, (Fig.2). A área livre da seção transversal será de 218 m², com altura máxima de 16.7m e largura máxima de 15.8m, em forma de ferradura.

Em números aproximados, as obras de duplicação do novo túnel Lagoinha-Concórdia somará escavação de 70 mil m³ de rocha, 60 mil m³ de solo, 20 mil m³ de concreto estrutural, 3 mil m³ de concreto projetado, além de 1.600t de aço para concreto armado.

Os cuidados especiais adotados em sua construção comprovaram que é possível superar problemas e transtornos próprios de uma obra localizada em área densamente povoada, compatibilizando soluções técnicas adequadas com as necessidades e aspirações da sociedade.

2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DO MACIÇO

A região urbana através da qual se desenvolveu a escavação do túnel consta de um maciço de rocha gnáissica, sobre o qual se encontram camadas de seu produto de alteração (saprolito), solo residual proveniente da mesma matriz e uma capa coluvionar. As espessuras relativas de tal substrato típico são significativamente diferentes nos dois emboques do túnel (Fig.2). Enquanto que no emboque Norte a rocha gnáissica praticamente aflora em superfície, permitindo um fácil emboque do túnel, no lado Sul grandes depósitos de botafora, lixo e aterro não compactado, foram lançados sobre o solo residual durante a urbanização da área.

Tal material pouco ou não consolidado, dentro do qual se situa o lençol freático, foi tratado e consolidado através de metodologias especiais a fim de permitir o avanço com segurança do túnel.

Como agravante adicional, neste emboque Sul, foi iniciada há tempos atrás a execução de um túnel, tendo sido deixados um trecho de abóbada aberta e revestida, seguido de um trecho de galeria de prospecção, com escoramento temporário em madeira, hoje totalmente apodrecida.

Nas figuras 3 a 5, esquematizadas em função das seções instrumentadas discutidas a seguir, apresentamos os perfis de subsolo transversais característicos da área do emboque Sul, interpretados a partir da campanha de investigações disponível.

As estimativas de comportamento realizadas para avaliar a aceitabilidade dos métodos de tratamento e executivos propostos foram baseadas somente em parâmetros geomecânicos sintetizados da experiência dos autores e dos consultores titulares em obras similares.

3. EVOLUÇÃO DA CONCEITUAÇÃO INICIAL DO PROJETO, EM FUNÇÃO DO MELHOR CONHECIMENTO DO PROBLEMA.

3.1. Projeto original do emboque

A concepção inicial de projeto deste emboque, consistia essencialmente de uma terraplenagem conformando o local e de estruturas de contenção adjacentes ao túnel, com postas por perfis metálicos.

O terrapleno projetado, inicialmente para taludes com inclinação 1:1 e cerca de 20 metros de altura, com escoramentos metálicos junto ao emboque, teria sido elaborado, levando em consideração parâmetros geomecânicos otimistas.

3.1.1. Necessidade de melhor conhecimento da encosta

A rigidez da imposição do emboque Sul, decorrente da implantação da obra em área já bastante urbanizada, da necessidade de integração ao sistema viário existente e do tipo de maciço que oferecia risco de instabilidade, somadas ao fato de que um insucesso traria sérias perdas materiais, sociais e eventualmente humanas, implicaram, em preocupações que nos convenceram da necessidade de um melhor conhecimento das condições geológico-geotécnicas da encosta, antes do início das obras.

Observações detalhadas e mapeamento de superfície mostraram que a encosta já apresentava movimentos de massa, caracterizados como rastejo, evidenciados por trincas a montante, próximo a um conjunto de edifícios e por deslocamentos de elementos de referência.

Evidenciou-se que a ação do homem prejudicou a condição da encosta natural recorrendo-a com os mais diversos materiais, variando de lixo a botaforas.

Outro fator preocupante foi a condição hidrogeológica pois o nível d'água, já próximo da interface entre o colúvio e o maciço residual poderia elevar-se e agravar as condições já críticas do maciço.

Em vista da situação delicada da implantação da obra, em todos os seus aspectos, e as incertezas contidas no projeto, foram revistos alguns conceitos de projeto baseados na premissa de que obras desta natureza devem ter como objetivo básico a redução de riscos.

3.2. Nova conceituação de emboque

As diretrizes básicas ponderadas foram:

- A encosta, onde as condições de estabilidade apresentavam-se em estado crítico, deveria ser objeto de tratamento visando consolidar o maciço, minimizando os riscos potenciais, tanto na execução do terrapleno, como na penetração do túnel.

- A contenção lateral junto ao emboque deveria ser reavaliada, buscando uma estrutura mais adequada aos empuxos e condições hidrogeológicas locais, uma vez que neste ponto seria mais econômico compatibilizar a estrutura com a permanência do maciço em sua condição natural:

Sob este enfoque a contenção passou a ser conceituada por uma parede diafragma atirantada e convenientemente drenada.

- Deveria ser dada atenção aos mapeamentos de campo e à interpretação dos serviços de tratamento do maciço para aquilatar informações que orientassem para eventuais revisões ou complementações do tratamento.

4. TRATAMENTO DO MACIÇO

Passaremos agora a discorrer sobre o tratamento de pré-consolidação para melhoria do maciço, que, dentre as diretrizes básicas para o novo projeto de emboque, foi o

ponto mais debatido devido ao seu caráter semi-empírico, que alia critérios internacionais à experiências pessoais e comparações com resultados anteriores obtidos em condições similares, as quais, adaptadas às características locais, à disponibilidade de recursos e equipamentos, conduzem a sua otimização técnica e econômica, visando o aumento de segurança das edificações próximas e melhores condições de penetração do túnel.

4.1. Evolução dos tratamentos preconizados

O projeto de pré-consolidação do maciço, inicialmente concebido apenas por meio de injeções de calda de cimento-bentonita em toda sua extensão, evoluiu para consolidação do tramo inicial com colunas de C.C.P. e injeções por clacagem no restante do trecho a melhorar.

O tratamento efetuado, teve como complemento um sistema de rebaixamento e controle de fluxo d'água através de poços profundos.

4.2. Consolidação por Colunas C.C.P.

Como já relatamos, o projeto original previa a pré-consolidação de todo trecho com injeções, porém a análise do maciço mostrou que o terreno, em suas estacas iniciais, composto por depósito de encosta argiloso e materiais heterogêneos lançados como botafora, tornava difícil a aplicação do tratamento através de injeções por "clacagem".

Dentre as dificuldades existentes ressaltamos:

- A baixa cobertura da região, onde as pressões de injeção ligadas à clacagem levam à abertura de fissuras que provocariam a fuga de calda para a superfície.

- Existência de materiais de baixas características de resistência na transição colúvio-solo residual, os quais, aliados ao regime hidrogeológico local, tornavam improvável a eficiência das injeções na consolidação dessa superfície potencialmente instável.

- Incerteza de chegar à consolidação dos diversos tipos de materiais lançados aleatoriamente nessa área, sem compactação, criando condições de existência de vazios e caminhos preferenciais de percolação que levariam a um elevado consumo de calda, impossível de ser quantificado a priori, sem as necessárias garantias de tratamento.

Com a ponderação destes fatores foi adotada a consolidação deste trecho do maciço através de colunas C.C.P., uma vez que estas tendem a homogeneizar o tratamento.

O dimensionamento das alturas das colunas em C.C.P. foi efetuado tomando-se por base o passo de avanço da escavação ou de eventuais instabilidades da frente "capelas" e a carga de solo sobrejacente que pode causar sua ruptura.

4.3. Tratamento por injeções

4.3.1. Considerações iniciais

O assunto suscita acalorados debates em qualquer de seus campos de aplicação, tais como: tratamento de fundação e ombreiras de barragens, reforço de fundações, tratamentos para melhoria geomecânica de maciço, bulbo de ancoragens, etc., uma vez que não existem métodos de cálculo que permitam estabelecer, em nível de projeto, critérios precisos, embasados em teorias e modelos matemáticos aceitos universalmente.

Desta forma, a concepção de projeto deverá ser fundamentada na experiência do Projetista, resultante de obras anteriores, e em modelos de comportamento de maciços, os quais devem ser criteriosamente analisados, uma vez que podem variar substancialmente de um campo de aplicação para outro, bem como dentro do mesmo campo de aplicação, em função da natureza do maciço. Este aspecto reveste-se de grande importância, não sendo raro obter-se efeitos insatisfatórios e mesmo contrários aos desejados, pelo uso de critérios inadequados de projeto e/ou técnicas incorretas na aplicação do tratamento.

No tratamento visando a melhoria geomecânica de maciços com injeções de calda de cimento-bentonita deve-se ressaltar a:

- distinção de tratamento entre maciços "virgens" e já rompidos e desarticulados.

- distinção de tratamento para maciços de comportamento frágil, daquele para terrenos homogêneos e compressíveis e ainda dos compostos por materiais permeáveis e incoerentes.

- estabelecimento de caldas que evitem grandes contrastes de resistência com o meio, sem jamais esquecer o objetivo final da melhoria do terreno.

- equipamentos que permitam a execução de furos uniformes e corretamente direcionados, e provoquem um mínimo de danos iniciais ao maciço.

- equipamentos que possibilitem o controle tanto da calda especificada, como dos critérios de injeções de projeto.

A experiência publicada apresenta indicações de malhas de furação, espessuras de região a ser tratada, critérios de injeção baseados em pressões e volumes, e critérios de aceitação do tratamento. Tais aspectos foram continuamente discutidos com as demais equipes envolvidas na obra, visando sua otimização e um tratamento eficiente do maciço.

4.3.2. Projeto inicial do tratamento por injeções

O projeto de consolidação do maciço por injeções foi concebido baseando-se em malha de 2.12 x 2.12m, com uma espessura de tratamento de 4.0m no contorno da escavação, e em critérios de injeções que estabeleciam:

- 3 fases de injeção de 100 litros em cada válvula manchete.
- pressão de injeção desejada para aceitação do tratamento (reação do maciço) em torno de 30 kgf/cm². No caso de tal faixa de pressão não ter sido atingida, seria executada uma eventual 4a. fase de injeções.

- calda de cimento-bentonita com A/C = 1,0 e adição de 2% de bentonita.

Na sequência de execução era especificada: injeção de furos alternados em uma mesma linha e de linha para linha formando assim uma malha inicial de 3.0m x 3.0m a qual era posteriormente fechada para 2.12m x 2.12m com a execução das injeções dos furos intermediários.

4.3.3. Análise dos critérios de projeto

Embora seja claro o fato de que a análise de projetos de injeção, estará sempre refletindo experiências pessoais, alguns aspectos mereceram, no caso, destaque especial, pois julgamos que as grandes dimensões do túnel, implantado em zona urbanizada e em maciço com a estabilidade das encostas já naturalmente críticas, não faria o local o mais indicado para a implementação de metodologias que pudessem levar à diminuição da eficiência do tratamento, numa proporção não quantificável.

Não julgamos relevante o ponto relativo à espessura de tratamento fixada em 4.0m, em discordância com a experiência nacional, obtida em solos de natureza semelhante, e com a internacional, conforme publicada, onde verifica-se que as espessuras de tratamento no contorno da escavação, principalmente na abóbada, nunca seriam inferiores ao raio da escavação. No túnel da Lagoinha tal espessura deveria ser de aproximadamente 8.0m; devido às condições particulares de execução em seção parcializada e consequente redução de seção equivalente escavada, julgamos que uma espessura de 6.0m aliada a uma técnica executiva extremamente cuidadosa, com passo de avanço reduzido e núcleo de estabilização da frente, poderia ser admitida.

Outro ponto que julgamos de igual relevância foi a malha de projeto de 2.12m x 2.12m, quando a experiência nos indicava como mais adequada a malha de 1.50 x 1.50m, que revelou-se eficiente em outros tratamentos similares, como por exemplo na Ferrovia do Aço. Reconhecemos que o espaçamento ideal, ou seja, a área de influência de cada furo, está condicionado a vários fatores como a natureza do maciço, critérios de injeção, etc.

Creemos que no presente caso a malha mais densa nos oferecia melhores condições de tratamento, visto que em solos saprolíticos, de ruptura frágil, condicionadas pelos planos de fraqueza e descontinuidades, a clacagem se daria em maior número de linhas, cimentando blocos do maciço e, embora sem elevar as características intrínsecas do material, traria melhorias no maciço como um todo, sendo assim consideravelmente mais eficiente que a malha mais aberta.

Cabe aqui, ressaltar que clacar o maciço significa rompê-lo localmente, por ação hidráulica, sem contudo abrir em demasia suas fraturas nem estender suas aberturas até pontos muito distantes, o que poderia potencialmente gerar fraturas abertas não preenchidas.

As pressões de injeção ponderadas como aceitáveis na fase inicial dos serviços seriam pressões impostas pelo maciço em reação à vazão da bomba, nos parecendo exageradas e podendo causar danos no maciço.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Uma vez indicados os serviços e obtidos os primeiros dados de campo, com as injeções sendo realizadas segundo os critérios iniciais estabelecidos pela projetista (item 4.3.2.) elaboramos análises do comportamento do maciço frente a esses serviços, as quais apresentamos adiante.

Cumpramos aqui, ressaltar que a Construtora optou por deixar número suficiente de válvulas adicionais em cada tubo para poder-se complementar o tratamento até a espessura de 6.0m caso se demonstrasse necessário. A interpretação dos boletins de campo du-

rante os serviços não demonstrou a validade de se injetar as manchetes até espessura equivalente de 6 metros. Tal decisão foi apoiada pela incorporação de sistema de rebaiamento profundo do lençol freático no trecho crítico situado entre o emboque e o ponto a partir do qual já existiria um recobrimento suficiente em rocha sã.

Faremos análise dos resultados obtidos, obedecendo à ordem cronológica de execução, e baseadas em gráficos nos quais foram plotados a pressão de injeção em função do tempo, para cada furo, cada manchete e fase de injeção.

5.1. Malha inicial de 3,0 x 3,0m

Observamos, nesta etapa dos serviços, furos de comportamento médios diferentes:

- existência de uma série de furos que apresentava tendência ao crescimento médio da pressão (Fig.6). Tendo sido mantidos invariáveis os critérios de injeção, é possível deduzir que o tempo de cura não influencia a capacidade do maciço de absorção de calda.

Observamos ainda que mesmo onde a tendência média é de crescimento, valores individuais, em número significativo, com comportamento francamente diversos da tendência média, mostra que as pressões de injeção impostas, vinham se apresentando inadequadas (Fig.7).

- tendências médias decrescentes ou constantes de pressões de injeção.

Inúmeros furos ou manchetes de determinados furos apresentaram as características acima em fases subsequentes de injeção (Fig.8).

As tendências generalizadas de pressões de injeção decrescentes ou constantes, mantidas invariáveis as condições de injeção, mostraram de maneira clara a imposição de rupturas incontroladas do maciço.

5.2. Malhas de 2,12 x 2,12 e 1,50 x 1,50m

No fechamento da malha para 2,12 x 2,12m e posteriormente para 1,50 x 1,50m, em algumas linhas experimentais, observamos as mesmas tendências já descritas para a malha inicial.

Cumpre-nos ressaltar que o fechamento para 1,50 x 1,50m só foi efetuado como teste inicial em alguns locais, por recomendação da Consultoria e iniciativa da Construtora.

5.3. Comentários

Embora não embasado em conceitos teóricos válidos para o tratamento em questão, pois o mesmo se dá por clacagem (fraturamentos hidráulicos sucessivos) e não por percolação, como em terrenos porosos homogêneos, poder-se-ia, em primeira aproximação com parar as pressões de injeção médias finais da última fase da malha mais aberta, em relação as pressões da primeira fase das malhas de fechamento.

Este análise não revela um gradiente sistemático de melhoria do maciço em função do fechamento, pois enquanto há um ligeiro benefício no fechamento da malha de 3,0 x 3,0m para a de 2,12 x 2,12m o mesmo não se verifica no subsequente fechamento para a malha de 1,50 x 1,50m.

Neste último caso as pressões de reação do maciço à injeção situam-se na mesma faixa de valores da malha de 2,12m havendo inclusive queda de pressão em fases subsequentes de injeção da mesma manchete.

Nos ensaios de manutenção de pressão após a injeção do volume preconizado, realizados para a verificação da aceitação do tratamento, tanto na malha inicial de 3,0m como na de 1,50m as pressões lidas, isolando-se totalmente o sistema, mostraram que em todas as manchetes nos quais o ensaio foi realizado, as pressões lidas no manômetro caíram, em tempo rápido, a valores muito baixos ou até nulos (Fig.9).

Este fato é justificado pela capacidade do maciço de ainda absorver facilmente calda em pressões próximas às pressões finais de ensaio, que se situaram entre 0 e 6 kgf/cm² e corrobora a tese de fraturamento incontrolado do maciço por pressões excessivas, atingindo não raro valores superiores a 30 kgf/cm².

5.4. Sugestões para melhoria do tratamento

Com base na análise dos resultados obtidos na fase inicial de tratamento e nas observações feitas em visitas ao local da obra, na oportunidade se elaborou sugestões no sentido de obter-se melhor proveito do tratamento efetuado, com a otimização de alguns conceitos, melhoria nos equipamentos empregados e na metodologia de execução.

5.4.1. Injetabilidade do maciço

Em fator tomado por nós como de sua importância foi a necessidade de conhecer-se melhor a injetabilidade do maciço, até então não elucidada pelos critérios de injeção

utilizados.

Para tanto, sugerimos a execução de ensaios que chamamos de "injetabilidade do maciço" e que se assemelha em metodologia aos chamados ensaios de perda d'água, diferindo nos incrementos de pressão no trecho obturado.

O ensaio visava estabelecer "in situ" uma curva relativa ao binômio pressão x vazão, obtendo as condições de absorção do maciço e a determinação dos valores mínimos e máximos de pressão de reação do maciço, podendo-se a partir deste dado estabelecer faixas de pressões, que reduzissem os riscos de rupturas e claqueamento excessivos.

Em linhas gerais este ensaio constitui-se de:

- rompimento cuidadoso da bainha e fechamento do sistema de injeção através de abertura imediata do retorno, fazendo a pressão retornar a zero.

- após o rompimento da bainha, determinar a pressão mínima de injeção a partir da pressão inicial (nula) aumentá-la lenta e gradualmente pelo fechamento cuidadoso do sistema de retorno, anotando-se a pressão equivalente ao início de absorção d'água pelo maciço, lida no hidrômetro acoplado ao sistema de injeção, esta pressão é denominada de pressão mínima (p min.). Repetir o ensaio algumas vezes para comprovação do p min.

- a partir deste ponto, determinar através de hidrômetro e manômetro precisos, pares de valores pressão-vazão que possibilitem a determinação da curva de injetabilidade na profundidade de ensaio.

- o ensaio deverá ser levado até a obtenção do limite superior da curva, ou seja, com a injeção da vazão máxima permitida pelo equipamento, ou verificação de que aumentos de vazão se dão sem variação significativa de pressão (rupturas excessivas) determinando-se assim a pressão máxima (p máx.).

O levantamento de famílias de curvas com a realização do ensaio em vários pontos do oocal a ser tratado e em algumas profundidades (2 ou 3) na espessura de tratamento, possibilita "mapear" a região e determinar critérios otimizados de injeção para cada trecho, caso isto seja necessário.

Como desconhecíamos a curva de injetabilidade para a calda sugerimos em primeiro grau de aproximação, curvas afins das levantadas nos ensaios com água, utilizando-se a relação de viscosidade entre a calda empregada e a água como fator de correção.

Alguns dos ensaios mencionados encontram-se na fig.10, mostrando uma perfeita adequação com o modelo imaginado.

5.4.2. Volumes a serem injetados

Entendemos que os volumes aplicados eram baixos e injetados a altas velocidades resultando em valores de pressões que rompiam de forma descontrolada o maciço, motivando as fases adicionais de injeção, muitas vezes sem melhoria nas características do terreno.

Assim, sugerimos a seguinte sistemática a ser utilizada durante a fase inicial do tratamento com injeções controladas.

- 3 fases de injeção de 100 litros, à vazão constante de 10 litros/min. em cada manchete.

- nas primeiras duas fases, fixação de pressão de reação limite de 12 kgf/cm², vinculando-se para a última fase a pressão de reação mínima de 8 kgf/cm².

- caso a pressão mínima não fosse atendida, execução de novas fases até satisfazê-los.

A análise criteriosa dos valores levantados, durante as primeiras injeções possibilitaria a otimização das quantidades a serem injetadas.

5.4.3. Equipamentos utilizados

Durante nossas visitas à obra, pudemos observar que seriam necessárias algumas melhorias relativas aos equipamentos empregados.

As bombas de fluxo descontínuo utilizadas não seriam as ideais para esta natureza de trabalho, pois provocam fortes oscilações nas pressões de injeção, sendo recomendáveis as de fluxo contínuo e que permitem regulagem de vazão.

Para minimizar estes inconvenientes sugerimos a introdução de 2 "pulmões" de estabilização, instalados em série, visando restringir as oscilações nos manômetros; a adaptação no retorno de uma válvula tipo esférica associada às tradicionais válvulas tipo borboleta, de abertura e fechamento imediatos, para possibilitar a regulagem do retorno; a instalação de uma régua graduada no depósito de calda de injeção que possibilitasse, mesmo que de maneira aproximada, a medição da vazão, em virtude da inexis-

tência no mercado de um medidor de vazão para calda, denominado "caldômetro".

Apesar dos esforços da Construtora em otimizar os equipamentos, inclusive adaptações para execução dos ensaios de injetabilidade, verificamos que ainda faltam acessórios apropriados para melhor qualidade no controle de injeções pois as válvulas do tipo esférico existentes sofrem rápido desgaste prejudicando a variação gradual do sistema de retorno, que controla o fluxo de injeção. Esforço especial junto aos fabricantes de equipamentos devem ser realizados para possibilitar as otimizações cabíveis em tratamentos similares.

5.4.4. Sequência executiva

Observamos também que um fator importante na qualidade do tratamento é a realização de uma boa furação e execução de uma bainha perfeita. Evidenciou-se que tão logo a furação seja executada é necessário a introdução do tubo provido de manchete e a execução imediata da bainha, pois verificamos também uma quantidade razoável de furos com bainhas incompletas ou mesmo impossíveis de serem executadas, em função de deteriorização do furo, comunicação entre furos, etc.

5.5. Interpretação dos resultados de injeção com vazão controlada

Os resultados obtidos com esta metodologia de injeção e sua análise levou-nos às seguintes ponderações:

- oscilações bruscas e significativas das pressões de reação do maciço, minuto a minuto, indicam a grande dificuldade de manter-se constante a vazão de injeção, à despeito dos esforços das equipes e das melhorias incorporadas aos equipamentos de injeção (Fig.11).

Devido às dificuldades mencionadas introduzimos na interpretação dos resultados do comportamento das injeções de calda os conceitos de vazão média, almejada como constante, e de pressão média resultante, para a injeção de volumes pré-fixados de calda.

Como conclusão desta análise queremos ressaltar que ficou evidente que a resposta do maciço foi significativamente modificada em relação à sistemática antiga de tratamento, verificando-se a inexistência de valores muito elevados de pressão (> 40 kgf/cm² como anteriormente encontrados), apesar das imperfeições existentes nos equipamentos de injeção.

A perfeita resposta do maciço ao ensaio de injetabilidade com água nos leva à convicção de que a sistemática de injeção proposta é suficientemente correta, podendo e devendo ser empregada em serviços similares, principalmente se aprimorada com a introdução de equipamentos mais eficientes.

6. REBAIXAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA

A abertura de poços de inspeção solicitada para verificação dos resultados do tratamento demonstrou-se impraticável e comprovou um fato já observado quando da execução de túneis em solos similares: o comportamento altamente instável do saprolito quando desconfinado e sujeito a ação d'água. Os poços antes de atingirem a região tratada alcançaram o nível d'água, o qual provocou carreamento incontrolável de material da parede e fundo dos poços, tornando impossível o avanço dos mesmos, mesmo com revestimento em anéis de concreto.

Com a adoção de sistema de rebaixamento associado ao tratamento já executado e sabedores por experiência de sua eficácia, a malha de 1,50 x 1,50m foi dispensada, aceitando-se a subseqüente superior. Sua utilização ficou restrita à áreas aonde a interpretação dos boletins de campo demonstrou a validade de fechamento de malha por injeções controladas. As áreas aonde resultou tal malha de tratamento, quer por injeções teste em fase de estudos, quer por orientação gerada pela interpretação das injeções em malha maior, se situam entre as estacas 21 + 5,50 e 21 + 13,00; e entre estacas 22 + 11,00 e 22 + 14,00.

O sistema de rebaixamento foi discutido dentro de características fundamentais:

- devido à natureza estruturada e heterogênea dos materiais constituintes do maciço, onde fluxo d'água se dá pelas descontinuidades e veios quartzo-feldspáticos, o dimensionamento dos poços elaborado teoricamente é irreal, uma vez que todas as formulações disponíveis referem-se a meios homogêneos isotrópicos, com espessuras e condições de contorno de aquífero definidas, etc.

- assim, a filosofia de trabalho a ser adotada para o rebaixamento deveria ser similar à adotada nos serviços de injeção, ou seja, baseada na experiência geológica adquirida e analisada e otimizada em função dos resultados obtidos com instrumentação expedita instalada para verificar a eficiência do sistema em operação.

- os poços deveriam atravessar toda camada de solo, rocha alterada e penetrar 2 metros em rocha sã, uma vez que no contato saprolito-rocha alterada, se dá a ocorrência do maior fluxo d'água.

- sugerimos ainda que nos poços deveria ter sido previsto a possibilidade de instalação de vácuo caso fosse necessário aumentar sua eficiência.

- instalação de piezômetros tipo Casagrande com bulbo na abóbada e medidores de N.A. no eixo do futuro túnel para comprovação da eficiência do rebaixamento.

- instalar poços afastados cerca de 2,0m da face externa do túnel e provê-los de eficiente sistema de filtros.

- adotar como espaçamento inicial o diâmetro da escavação.

A constatação de que um eficiente sistema de rebaixamento age não só na eliminação de carreamento como também é fator estabilizante, pela inversão do fluxo, nos faz crer que sempre que possível o mesmo deve ser empregado, seja associado a outros tipos de tratamento, ou mesmo isolados em determinadas circunstâncias.

CONCLUSÃO

As metodologias de tratamento do maciço demonstraram-se eficientes para o desenvolvimento da Obra.

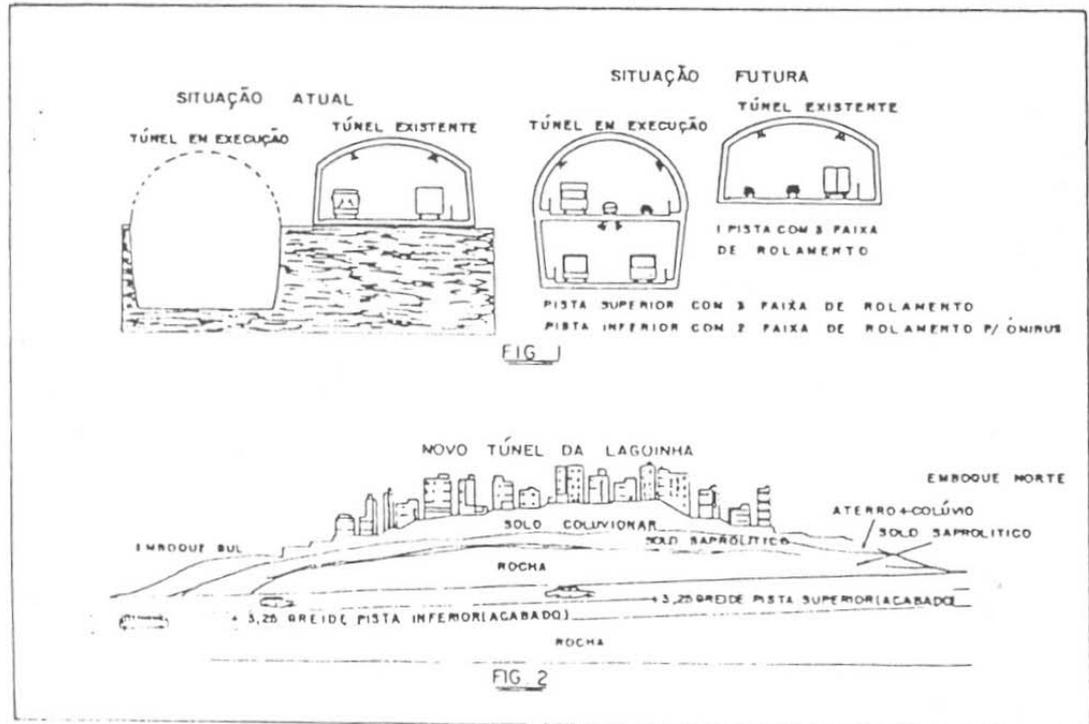
Otimizações da metodologia de injeções foram introduzidas logo no início dos serviços, lastreadas na interpretação criteriosa dos boletins de campo do próprio tratamento, assim como em alguns ensaios especiais de injetabilidade.

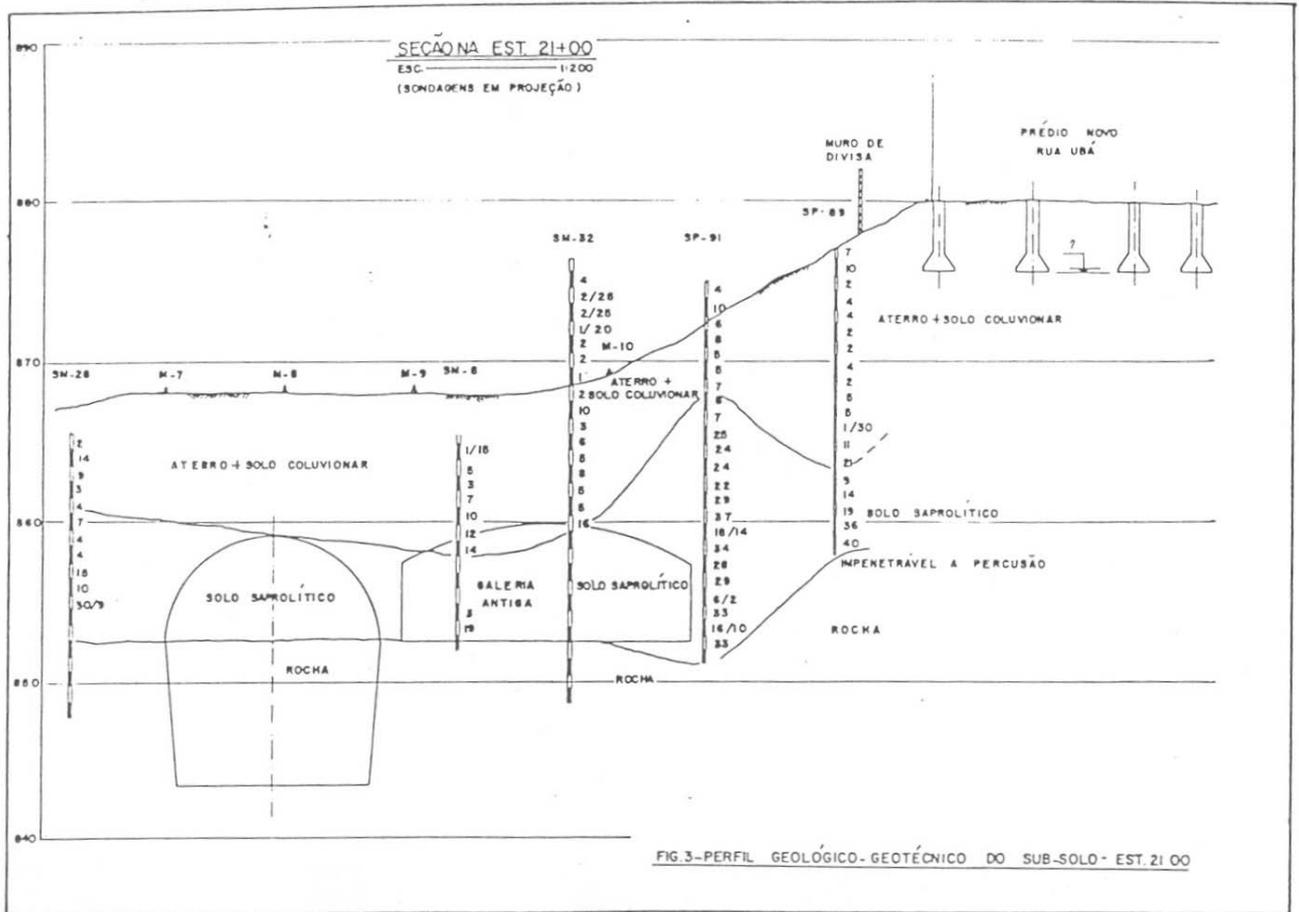
AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de manifestar seus agradecimentos aos consultores titulares de apoio à Obra, Prof. Victor F.B.de Mello, Prof. Mosze Gitelman e Eng^o Marcelo Pucci, cuja valiosa experiência foi essencial para as bem sucedidas otimizações da Obra.

BIBLIOGRAFIA

- . CALEIRO, A.C.M., CAMPANHÃ, C.A. e DE MELLO, L.G.F.S. - 1986 - "Túnel da Lagoinha - Método Construtivo e Comportamento Observado" - 6^o COBRAMSEF, Porto Alegre.
- . CAMPANHÃ, C.A. - 1982. Tratamento de maciços por injeção - Anais do Simpósio sobre Escavações Subterrâneas - ABGE, Rio de Janeiro.
- . DE MELLO, V.F.B. - 1981. Proposed Bases for Collating Experiences for Urban Tunneling Design - Symposium on Tunelling and Deep Excavations in Soils-ABMS-São Paulo.
- . Relatórios internos elaborados pela Consultoria para a Construtora e Proprietária.





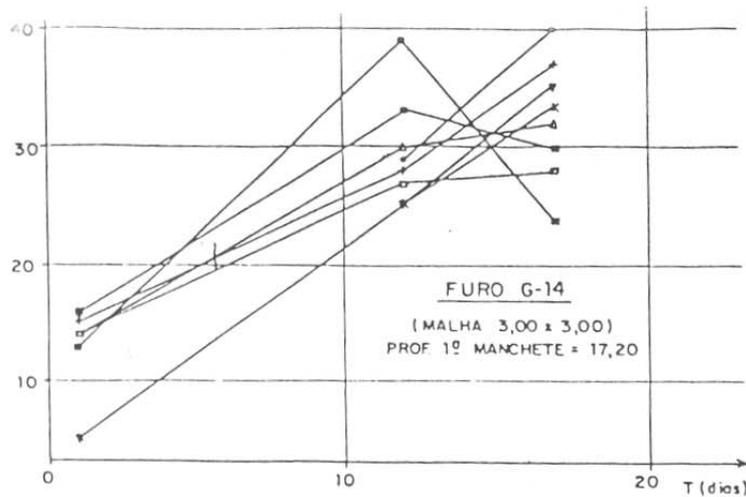


FIG. 6 - TENDÊNCIAS MÉDIAS CRESCENTES DAS PRESSÕES DE INJEÇÃO

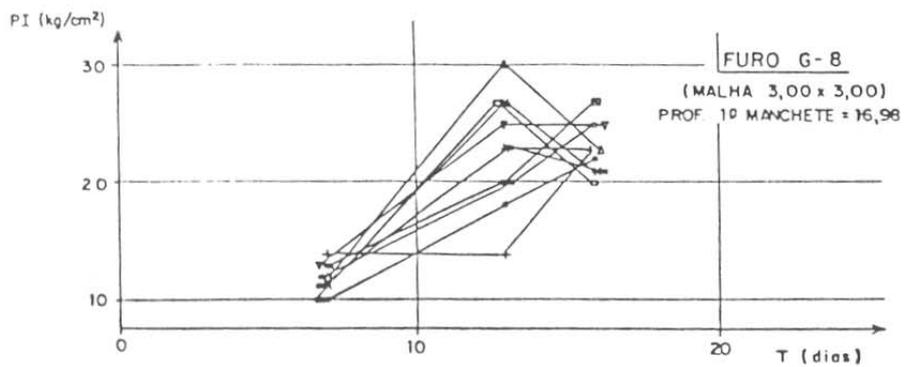


FIG. 7 - TENDÊNCIAS MÉDIAS CRESCENTES DAS PRESSÕES DE INJEÇÃO

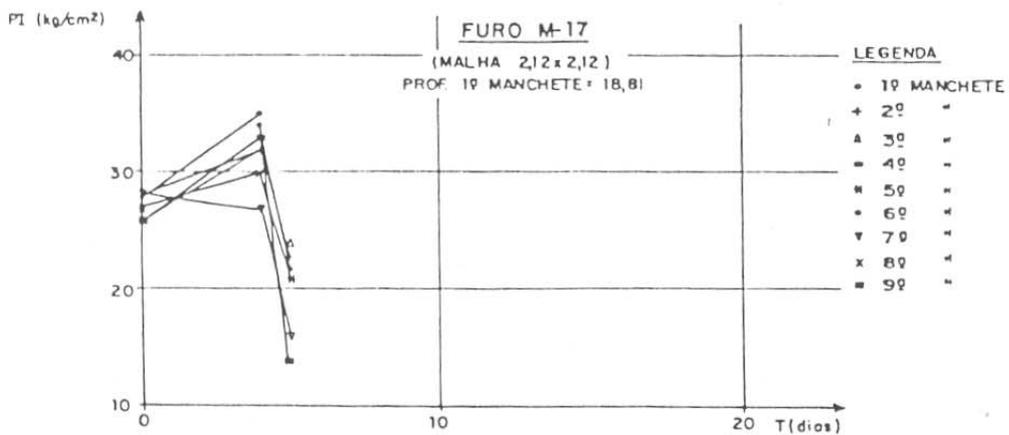


FIG. 8 - TENDÊNCIAS DECRESCENTES DAS PRESSÕES DE INJEÇÕES PARA VALORES INDIVIDUAIS

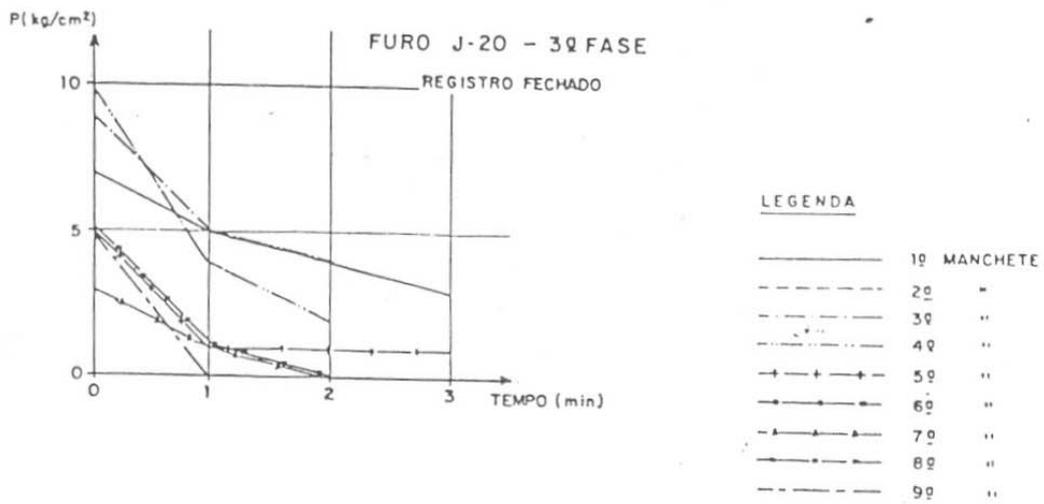


FIG. 9 - ENSAIO DE MANUTENÇÃO DE PRESSÃO

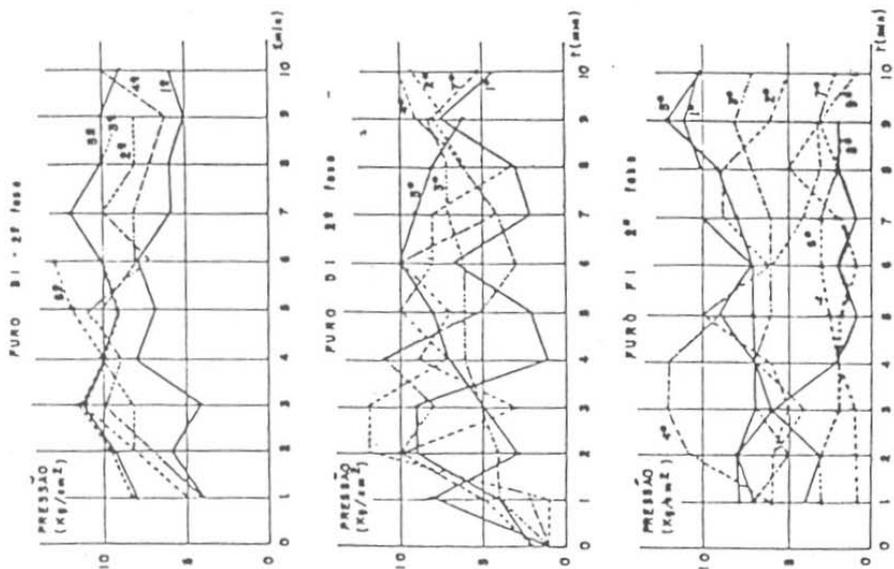


FIG. 11 - VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE INJEÇÃO NO TEMPO POR FASE DE INJEÇÃO

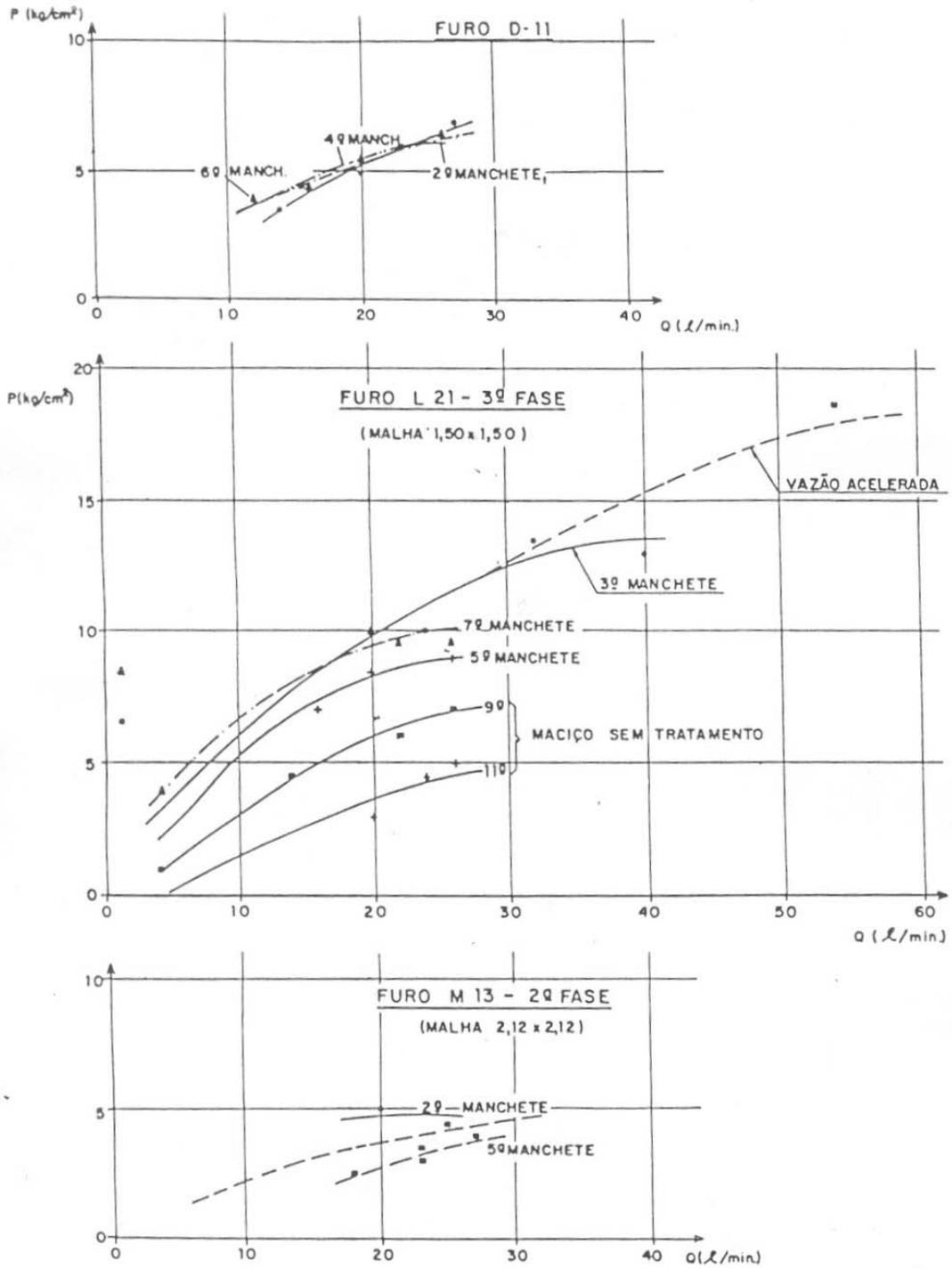


FIG. 10- ENSAIO DE INJETABILIDADE